饲用高水溶性磷酸一二钙对断奶仔猪生长性能、饲粮消化率、血清和骨骼指标的影响

吕小康　柴建民　王　杰　司丙文　崔　凯　王世琴　屠　焰　刁其玉　张乃锋*

（中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放实验室，北京　100081）

摘　要：本研究以磷酸氢钙（DCP）为参照物，以断奶仔猪生长性能、饲粮消化率、血清和骨骼指标为对象，评价饲用高水溶性磷酸一二钙（MDCP）的相对生物学利用率。试验采用 2×5 因子随机试验设计，选择 432 头 4~5 周龄、体重相近的杜×长×大杂交断奶仔猪为试验动物，随机分为 9 组，每组 6 个重复，每个重复 8 头猪。每种矿物盐设 5 个磷添加水平，分别为 0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%，共 9 个处理（0 添加组共用）。试验预试期 3 d，正试期 35 d。结果表明：1）仔猪平均日采食量、平均日增重及死亡率等指标在磷源和磷添加水平之间均不存在显著交互作用（$P > 0.05$）。试验第 15～35 天，MDCP 组仔猪平均日采食量显著高于 DCP 组（$P < 0.05$）；试验第 15～35 天和第 1～35 天，随着饲粮磷水平的提高，仔猪的平均日增重和平均采食量均显著增加（$P<0.05$），但饲料转化率无显著变化（$P>0.05$）。2）不同磷酸盐和磷添加水平之间对仔猪饲粮干物质、钙和磷的表观消化率均无显著交互作用（$P > 0.05$）。MDCP 组饲粮钙和磷的表观消化率均显著高于 DCP 组（$P < 0.05$）；0.10%、0.15%和 0.20%无机磷添加组钙的表观消化率显著高于 0 添加组（$P < 0.05$）。以磷酸盐中磷的表观消化率、真消化率为指标建立回归方程，根据斜率比计算 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率均为 120%。3）试验第 14 天和第 35 天时，不同磷源和磷添加水平对仔猪血清碱性磷酸酶（ALP）活性均无显著影响（$P > 0.05$），也无显著交互作用（$P > 0.05$）。试验第 14 天时，血清磷、钙和甲状旁腺素（PTH）含量在不同磷源和磷添加水平之间存在显著交互作用（$P < 0.05$），但试验第 35 天时不存在显著交互作用（$P < 0.05$）。试验第 14 天时，MDCP 组血清钙含量显著高于 DCP 组（$P < 0.05$），MDCP 组血清降钙素（CT）含量显著低于 DCP 组（$P < 0.05$）。试验第 14 天和第 35 天时血清 CT 含量在不同磷酸盐和不同磷添加水平之间无显著交互作用（$P > 0.05$）。血清钙、磷和 PTH 含量与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（$P<0.05$）。以血清钙、磷和 PTH 含量为指标建立回归方程，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率为 96%、102%和 115%，平均值为 104%。4）不同磷酸盐和不同无机磷添加水平对仔猪股骨、胫骨和掌骨的骨骼断裂强度均无显著影响（$P > 0.05$），也无显著交互作用（$P > 0.05$）。股骨灰分与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（$P<0.05$）。以股骨灰分含量为指标，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率为 255%。综上所述，以试剂级 DCP 的生物学利用率为 100%，以磷酸盐中磷的表观消化率和真消化率为指标，MDCP 的相对生物学利用率均为 120%；以血清指标和股骨灰分含量为指标，MDCP 的相对生物学利用率分别为 104%和 255%。

关键词：断奶仔猪；磷酸一二钙；磷酸氢钙；生长性能；消化率；血清指标；骨骼指标；相对生物学利用率

中图分类号：S816　　文献标识码：A　　文章编号：

收稿日期：2017-12-01

基金项目：云天化国际植物营养研究院开放项目（YTHZWYJY2016004）

作者简介：吕小康（1994—），男，山西长治人，硕士研究生，研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail: 13121991399@163.com

*通信作者：张乃锋，研究员，硕士生导师，E-mail: zhangnaifeng@caas.cn

磷是猪所必需的常量元素之一，在体内发挥重要的作用[1]。仔猪由于生长发育迅速，每千克体重需要磷 4~5 g，饲粮缺乏磷会导致仔猪出现食欲降低、异食癖、生长速度缓慢和骨骼发育异常等现象。目前，饲料中常用的矿物质磷酸盐有磷酸氢钙（dibasic calcium phosphate，DCP）、磷酸二氢钙（mono-calcium phosphate，MCP）、磷酸一二钙（mono-calcium and di-calcium phosphate，MDCP）和磷酸钙（calcium phosphate，CP）等。DCP 作为枸溶性盐，动物对其吸收率较低[2]，MCP 比 DCP 吸收率高，但是价格昂贵。MDCP 是 MCP 与 DCP 的共晶结合物，水溶磷、总磷含量高，动物对 MDCP 的吸收率比 DCP 好得多[3]。因此，客观评定其生物学利用率对于科学利用 MDCP，提高饲粮配制的精准度和仔猪生长性能显得尤为重要。前人在仔猪[4-5]、肉鸡[6]和蛋鸡[3]上的研究均表明 MDCP 较 DCP 可以提高动物的生长性能。万荣等[7]研究表明，MDCP 较 DCP 能够显著降低仔猪的腹泻率，并且能够改善仔猪的肠道微生态环境。前人评价 MDCP 的相对生物学利用率多以 DCP 为参照物，但不同研究获得的 MDCP 的生物学利用率差异较大。曹慧[5]报道以 DCP 生物学利用率为 100%，以平均日增重为评价指标，仔猪对 MDCP 的相对生物学利用率约为 108.80%；MDCP 组仔猪血清磷含量和碱性磷酸酶活性显著高于 DCP 组，且以血清磷含量和碱性磷酸酶活性为评价指标，仔猪对 MDCP 的相对生物学利用率分别为 260.42 和 197.18%。在肉鸡上以体增重为指标、蛋鸡上以产蛋性能为指标的研究表明，MDCP 相对于 DCP 的平均生物学利用率分别为 90.42%[8]和 102.50%[9]。近年来，MDCP 越来越受关注，而 MDCP 在仔猪上的生物学利用率研究非常缺乏，这阻碍了 MDCP 在仔猪饲粮中的科学应用。因此，本研究选用玉米－豆粕型饲粮，通过多元线性回归法测定仔猪猪内源磷排泄量以及 MDCP 的真消化率，选用 DCP 为参照，以生长性能、消化率、血清和骨骼为指标，计算 MDCP 的相对生物学利用率，以期为 MDCP 在仔猪饲粮中的合理添加提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验时间和地点

本试验于2016年4月—7月在北京市天鹏兴旺养殖场进行。

1.2　试验设计和试验动物

试验采用2×5因子完全随机试验设计，以分析纯DCP为标准参照物，对MDCP进行相对生物学利用率评价。DCP和MDCP各设5个磷添加水平，分别为0、0.05%、0.10%、0.15%和0.20%，共9个处理（0添加组共用）。选择4～5周龄，体重、日龄相近的杜×长×大杂交断奶仔猪432头，按体重、性别、年龄一致的原则分为9组，每组设6个重复，每个重复8头猪。试验期共38 d，预试期3 d，正试期35 d。

1.3　试验饲粮

参照NRC（2012）中关于11～25 kg仔猪营养需要配制玉米-豆粕型基础饲粮，分别向基础饲粮中梯度添加DCP或MDCP，使参试物磷的添加水平依次为0、0.05%、0.10%、0.15%和0.20%，从而每种参试物形成5个试验饲粮，共计9种试验饲粮（对照组共用）。所有试验饲粮的钙磷比保持不变，其他营养水平与基础饲粮保持一致，基础饲粮组成及营养水平见表1。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table1　Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis)　　%

原料 Ingredients	含量 Content	营养水平 Nutrient levels[2)]	含量 Content
玉米 Corn	63.00	干物质 DM	91.90
豆粕 Soybean meal	31.00	代谢能 ME/（MJ/kg）	12.73
脂肪粉 Fat powder	1.50	净能 NE/（MJ/kg）	9.87
预混料 Premix[1)]	1.00	粗蛋白质 CP	19.85
食盐 NaCl	0.30	粗脂肪 EE	4.08
赖氨酸 Lysine	0.50	粗纤维 CF	2.84
蛋氨酸 Methionine	0.10	钙 Ca	0.65
胆碱 Choline	0.10	总磷 TP	0.36
稻壳粉 Rice husk	0.50	非植酸磷 Non-phytic acid phosphorus	0.13
沸石粉 Zeolite	1.57	赖氨酸 Lysine	1.37
石粉 Limestone	0.43	蛋氨酸 Methionine	0.38
合计 Total	100.00	色氨酸 Tryptophan	0.22

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kilogram of the diet：VA 5 512 IU，VD 640 IU，VE 20 IU，VK_3 2.2 IU，VB_1 1.5 mg，VB_2 5.5 mg，VB_6 2.2 mg，VB_{12} 27.6 μg，*D*-泛酸 *D*-pantothenic acid 14.8 mg，烟酸 niacin 30.3 mg，生物素 biotin 0.05 mg，胆碱 choline 500 mg，Cu 50 mg，Fe 100 mg，Mn 10 mg，Zn 50 mg，I 0.85 mg，Se 0.25 mg。

[2)]营养水平除代谢能、净能及非植酸磷外均为实测值。Nutrient levels were all measured values except ME, NE and non-phytic acid phosphorus.

1.4　饲养管理

试验仔猪饲养于保育舍内，舍温保持在(28±2) ℃，及时通风与清理粪便，每周消毒2次。仔猪自由饮水，每2个猪圈共用1个料槽，采食量为每2个圈共用1个重复，每日喂1次，每次以食后略有剩余为度。试验正试期为35 d，记录每天猪的采食量和剩料量以及死亡头数。

1.5　消化试验

利用指示剂法在正式试验第20天进行消化代谢试验。在饲粮中添加0.1％的二氧化钛（TiO_2），饲喂给所有试验仔猪。试验期10 d，前5 d饲喂含有TiO_2的饲粮但不采样，从试验第6天开始，每天上午和下午各收集1次粪样，连续收集5 d，每次约收集粪样约200 g，每100g粪便加入10%硫酸10 mL，放置于冰箱-20 ℃冷冻保存。最后，以重复为单位，将收集的粪样合并为同一个样品，经过充分搅拌混匀后，取约500 g作为最终粪样，放置于冰箱－20 ℃冷冻保存。

1.6　样品采集与测定指标

1.6.1　饲粮常规养分含量

于试验前对饲粮主要原料和配好的饲粮进行化学分析，分析指标为：干物质、总钙、总磷、总能和粗蛋白质。具体分析方法参见张丽英[10]的方法，其中 TiO_2 采用分光光度法[11]。

1.6.2　生长性能

每天记录每圈猪的投料量与剩料量，计算此阶段的平均日采食量。分别于试验的第1天、第14天和第35天08:00前对每重复仔猪空腹称重，计算此阶段的平均日增重，并根据采食量和日增重计算饲料转化率。

1.6.3　消化率的计算

首先测定粪样及饲料样中干物质、钙、磷和TiO_2的含量。具体方法参见张丽英[10]的方法，其中TiO_2采用分光光度法[11]。按罗赞等[12]、Fan等[13]和Shen等[14]介绍的方法计算各消化率指标。

1.6.3.1　饲粮表观消化率

$$D_A=1-[（ID×PI）/（II×PD）]×100 \qquad ①$$

式中：D_A为被测饲粮干物质或磷的表观消化率（%），ID为饲粮中TiO_2的含量（g/kg），PI为粪中干物质或磷的含量（g/kg），II为粪中TiO_2的含量（g/kg），PD为饲粮中干物质或磷的含量（g/kg）。

1.6.3.2　磷酸盐表观消化率

将饲粮表观可消化磷表示成“g/kg DMI”，可由公式②计算：

$$N_A=N_D×D_A \qquad ②$$

式中：N_A为饲粮表观可消化磷（g/kg DMI），N_D为饲粮磷含量（g/kg DM），D_A为饲粮磷表观消化率（%）。

如果基础饲粮和待测磷酸盐中磷的消化率之间没有交互作用，则其关系可表示为公式③：

$$N_A=（D_{1\text{-}A}/100）×N_{1D}+（D_{2\text{-}A}/100）×N_{2D} \qquad ③$$

式中：N_A为饲粮表观可消化磷（g/kg DMI），由公式②计算；$D_{1\text{-}A}$和$D_{2\text{-}A}$分别为待测原料和基础原料磷表观消化率（%）；N_{1D}和N_{2D}为饲粮中分别来源于待测原料和基础原料的磷含量（g/kg DM）。公式③实际上是一个多元线性回归模型，N_A是因变量，N_{1D}和N_{2D}是自变量，$D_{1\text{-}A}$和$D_{2\text{-}A}$可根据建立的无常数回归模型估计出来。

1.6.3.3　磷酸盐真消化率

如饲粮基础原料和待测原料中磷消化率之间无交互作用，则其关系可表示为式④:

$$N_A=-N_E+[（D_{1\text{-}T}/100）×N_{1D}]+[（D_{2\text{-}T}/100）×N_{2D}] \qquad ④$$

式中：N_A为饲粮粪表观可消化磷（g/kg DMI），由式②计算；N_E为内源粪磷排泄量（g/kg DMI）；$D_{1\text{-}T}$和$D_{2\text{-}T}$分别为待测原料和基础原料磷真消化率（%）；N_{1D}和N_{2D}为饲粮中分别来源于待测原料和基础原料的磷（g/kg DM）。式④实际上是一个多元线性回归模型，N_A是因变量，N_{1D}和N_{2D}是自变量，回归系数N_E、$D_{1\text{-}T}$和$D_{2\text{-}T}$可根据建立的回归模型估计出来。

1.6.4　血清指标

于试验第14天和第35天清晨饲喂前，在每重复选取体重居中的1头试猪实施前腔静脉采血5 mL。血样离心后收集上清夜置于－20 ℃的冰箱中待测。血清指标主要分析血清碱性磷酸酶活性与血清无机钙、无机磷、降钙素以及甲

状旁腺素含量。血清钙含量采用邻酚酞络合酮比色法（全自动生化分析仪）测定，血清磷含量采用磷钼酸法（全自动生化分析仪）测定，血清碱性磷酸酶活性、血清降钙素和甲状旁腺素含量采用酶联免疫吸附试验（ELISA）检测试剂盒测定。具体操作按试剂盒说明进行。

1.6.5　骨骼指标

于试验的第35天，每重复分别选取体重居中的1头猪放血屠宰，并取其股骨、胫骨及第三四掌骨，去除肌肉、筋腱后密封于塑料袋内，置于－20 ℃冰箱保存。

骨骼断裂强度：骨骼断裂强度用骨骼断裂强度试验机测定，以kg表示骨骼断裂强度。

骨骼灰分含量：把经过断裂强度测定的骨样放入乙醇溶液中浸泡48 h后取出，随即放入乙醚溶液中浸泡48 h进行脱脂，捞出，烘干至恒重，称得脱脂干骨重。随后测定股骨、胫骨和掌骨的灰分含量。

骨骼钙、磷含量：采用原子吸收法测定钙含量，采用钼黄比色法测定磷含量。

1.7　统计分析

试验数据先用Excel 2010整理再采用SAS统计软件GLM模块对数据进行方差分析，差异显著则用Duncan氏法进行多重比较。采用多元线性回归模型斜率比法[15]计算MDCP的相对于DCP的生物学利用率。以P＜0.05作为差异显著的判别标准。

2　结果与分析

2.1　不同磷酸盐对断奶仔猪生长性能的影响

不同磷酸盐对断奶仔猪生长性能的影响见表 2。由表可知，断奶仔猪体重、平均日采食量、平均日增重、饲料转化率和死亡率在磷源与磷添加水平之间均不存在显著的交互作用（P>0.05）。不同磷源显著影响了试验后期（第15~35 天）断奶仔猪平均日采食量，且以 MDCP 组显著高于 DCP 组（P>0.05）。

除此之外，不同磷源对各组体重、平均日增重、平均日采食量、饲料转化率和死亡率均无显著影响（P>0.05）。不同无机磷添加水平显著影响了断奶仔猪试验后期和试验全期的平均日增重（P < 0.05）；试验后期 0.20%无机磷添加组断奶仔猪平均日增重显著高于 0 和 0.05%无机磷添加组（P < 0.05）；试验全期 0.20%无机磷添加组断奶仔猪平均日增重显著高于其他无机磷添加组（P < 0.05），其中 0.15%无机磷添加组断奶仔猪平均日增重显著高于 0.05%无机磷添加组（P < 0.05）。不同无机磷添加水平显著影响了断奶仔猪试验后期和试验全期平均日采食量（P < 0.05）；试验后期 0.05%无机磷添加组断奶仔猪平均采食量显著低于其他各组（P < 0.05）；试验全期 0.10%、0.15%和 0.20%无机磷添加组断奶仔猪平均采食量显著高于 0 和 0.05%无机磷添加组（P < 0.05）。综上所述，本试验的结果表明随着饲粮磷水平的上升，断奶仔猪的平均日增重和平均采食量均显著增加（P<0.05），但饲料转化率无显著变化（P>0.05）。

参照 Littell 等[15]的方法进行多元线性回归分析，结果显示，平均日增重、平均日采食量与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（P<0.05）。以平均日增重和平均日采食量为指标，建立的回归方程分别为：

$$Y_1=238.28+103.26X_1+127.12X_2（R^2=0.218，P=0.006）;$$

$$Y_2=588.47+127.06X_1+157.07X_2\ (R^2=0.410,\ P=0.010)。$$

式中：Y_1 表示平均日增重（g/d），Y_2 表示平均日采食量（g/d），X_1、X_2 分别表示 DCP、MDCP 的磷添加水平（g/d）。以DCP中磷的生物学利用率为100%，根据回归方程斜率比计算的MDCP的相对生物学利用率分别为123%和124％。

表 2　不同磷酸盐对断奶仔猪生长性能的影响

Table 2　Effects of different phosphates on growth performance of weaned piglets

项目 Items	磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	体重 BW/kg			平均日增重 ADG/（g/d）			平均日采食量 ADFI/（g/d）			饲料转化率 FCR			死亡率 Mortality/%
		第 1 天 The 1st day	第 14 天 The 14th day	第 35 天 The 35th day	1~14 天 Day 1 to 14	15~35 天 Day 15 to 35	1~35 天 Day 1 to 35	1~14 天 Day 1 to 14	15~35 天 Day 15 to 35	1~35 天 Day 1 to 35	1~14 天 Day 1 to 14	15~35 天 Day 15 to 35	1~35 天 Day 1 to 35	1~35 天 Day 1 to 35
磷酸氢钙 DCP	0	8.95	14.55	19.15	400.13	218.80	291.33	569.31	780.44	687.56	0.72	0.33	0.46	8.33
	0.05	8.30	13.73	18.44	387.48	224.51	289.70	591.06	669.21	641.71	0.67	0.30	0.44	8.33
	0.10	8.11	14.27	19.85	440.66	265.86	335.78	613.12	774.85	712.38	0.71	0.28	0.43	8.33
	0.15	8.78	15.53	20.43	482.25	233.53	333.02	628.78	808.18	736.49	0.83	0.30	0.48	2.08
	0.20	8.28	14.32	21.16	431.56	325.83	368.12	606.97	866.06	765.03	0.71	0.31	0.44	2.08
磷酸一二钙 MDCP	0.05	8.44	13.60	18.29	369.04	223.23	281.55	551.32	721.29	650.69	0.70	0.35	0.47	6.25
	0.10	9.08	14.79	21.80	408.26	333.75	363.56	637.44	870.18	774.09	0.62	0.32	0.43	8.33
	0.15	8.01	15.65	21.51	545.27	278.99	385.50	650.07	900.45	795.68	0.81	0.25	0.44	8.33
	0.20	8.37	15.32	22.62	496.29	347.63	407.09	659.62	941.18	828.62	0.83	0.37	0.52	2.08
SEM		0.23	0.82	1.35	55.15	42.05	36.41	49.25	54.38	45.09	0.06	0.07	0.05	4.03
磷源 Phosphorus	磷酸氢钙 DCP	8.36	14.46	19.97	435.49	262.43	331.65	598.79	758.34^{a}	696.64	0.73	0.31	0.45	5.21
	磷酸一二钙 MDCP	8.47	14.84	21.06	454.71	295.90	359.43	621.00	852.36^{b}	757.27	0.74	0.32	0.46	6.25

source														
磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	0	8.95	14.55	19.15	400.13	218.80^{a}	291.33^{ab}	570.61	769.84^{b}	682.68^{a}	0.70	0.31	0.44	8.33
	0.05	8.37	13.67	18.37	378.26	223.87^{a}	285.63^{a}	569.87	693.22^{a}	644.56^{a}	0.68	0.32	0.45	7.29
	0.10	8.59	14.53	20.83	424.46	299.81^{ab}	349.67^{ab}	623.98	833.11^{b}	748.11^{b}	0.69	0.32	0.45	8.33
	0.15	8.39	15.59	20.97	513.76	256.26^{ab}	359.26^{b}	636.79	856.37^{b}	765.95^{b}	0.82	0.28	0.46	5.20
	0.20	8.33	14.82	21.89	463.92	336.73^{b}	387.61^{c}	631.08	909.78^{b}	799.04^{b}	0.77	0.35	0.48	2.08
*P*值 *P*-value	磷源 Phosphorus source	0.512	0.518	0.263	0.625	0.267	0.287	0.656	0.045	0.124	0.765	0.613	0.648	0.717
	磷添加水平 Phosphorus supplemental level	0.685	0.152	0.074	0.105	0.046	0.042	0.460	0.007	0.017	0.051	0.669	0.769	0.433
	磷源×磷添加水平 Phosphorus source×phosphorus supplemental level	0.079	0.910	0.882	0.724	0.860	0.858	0.767	0.978	0.899	0.402	0.869	0.720	0.753

同列数据肩标不同字母表示差异显著（*P*<0.05）。下表同。

In the same column, values with different letter superscripts mean significantly different (*P*<0.05). The same as below.

2.2　不同磷酸盐对断奶仔猪饲粮钙磷消化率的影响

2.2.1　饲粮钙磷表观全消化道消化率

饲粮干物质、钙和磷的表观消化率由公式①计算，结果见表 3。不同磷酸盐与磷添加水平对断奶仔猪饲粮干物质、钙和磷表观消化率均无显著交互作用（P>0.05）。磷酸盐种类及添加水平对断奶仔猪饲粮干物质表观全消化道消化率无显著影响（P > 0.05），但是磷酸盐种类和添加水平对断奶仔猪饲粮钙和磷的表观全消化道消化率均有显著影响（P < 0.05）。断奶仔猪饲粮中添加 MDCP 时，饲粮钙和磷的表观全消化道消化率均显著高于添加 DCP（P < 0.05）；0.15%和 0.20%无机磷添加组饲粮钙的表观全消化道消化率显著高于 0 和 0.05%无机磷添加组（P < 0.05），0.05%和 0.10%无机磷添加组饲粮钙的表观全消化道消化率显著高于 0 无机磷添加组（P < 0.05）；0.20%无机磷添加组饲粮磷的表观全消化道消化率显著高于 0、0.05%和 0.10%无机磷添加组（P < 0.05），0.15%无机磷添加组饲粮磷的表观全消化道消化率显著高于 0 和 0.05%无机磷添加组（P < 0.05），同时 0.05%和 0.10%无机磷添加组饲粮磷的表观全消化道消化率显著高于 0 无机磷添加组（P < 0.05）。

磷的表观全消化道消化率、表观可消化磷与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（P<0.05）。以磷的表观全消化道消化率和表观可消化磷为指标，建立的回归方程为：

$$Y_3=46.48+74.06X_1+101.15X_2\ (R^2=0.719,\ P<0.001);$$

$$Y_4=1.477+10.31X_1+12.20X_2\ (R^2=0.835,\ P<0.001).$$

式中：Y_3 表示磷的表观全消化道消化率（%），Y_4 表示表观可消化磷（g/kg），X_1、X_2 分别表示 DCP、MDCP 的磷添加水平（%）。以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率为 137%和 118%。

表 3　不同磷酸盐对断奶仔猪饲粮表观消化率的影响

Table 3　Effects of different phosphates on apparent digestibility of diets in weaned piglets

项目 Items	磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	表观全消化道消化率 ATTD/%			表观可消化磷 ADP/（g/kg DMI）
		干物质 DM	钙 Ca	磷 P	
磷酸氢钙 DCP	0	85.51[a]	47.71	45.42	2.13
	0.05	89.62[b]	61.23	49.38	1.93
	0.10	91.67[c]	66.90	53.90	2.21
	0.15	89.82[b]	67.36	58.47	3.33

	0.20	89.49^{b}	65.35	60.75	3.46
磷酸一二钙 MDCP	0.05	90.43^{bc}	65.69	55.44	2.33
	0.10	90.42^{bc}	66.81	57.87	2.55
	0.15	90.79^{bc}	75.49	62.58	3.38
	0.20	91.05^{bc}	75.51	68.03	3.88
SEM		0.55	2.09	2.61	0.09
磷源 Phosphorus source	磷酸氢钙 DCP	90.15	65.21^{a}	55.47^{a}	2.70^{a}
	磷酸一二钙 MDCP	90.67	70.88^{b}	60.98^{b}	3.03^{b}
磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	0	85.51	47.71^{a}	45.43^{a}	2.13^{a}
	0.05	90.02	63.46^{b}	52.41^{b}	2.13^{a}
	0.10	91.05	66.86^{bc}	56.07^{bc}	2.38^{b}
	0.15	90.30	71.42^{c}	60.53^{cd}	3.36^{c}
	0.20	90.27	70.43^{c}	64.72^{d}	3.69^{c}
*P*值 *P*-value	磷源 Phosphorus source	0.187	<0.001	<0.001	<0.001
	磷添加水平 Phosphorus supplemental level	0.291	<0.001	<0.001	<0.001
	磷源×磷添加水平 Phosphorus source×phosphorus supplemental level	0.073	0.088	0.836	0.234

2.2.2　磷酸盐中磷的表观消化率

根据公式③建立的回归方程为：

$$Y=0.467X_0+0.864X_1+1.036X_2\ (R^2=0.997,\ P<0.001)。$$

式中：Y 表示表观可消化磷的摄入量（g/kg DMI），X_0 表示来源于基础饲粮的磷含量（g/kg DM），X_1 表示来源于 DCP 的磷含量（g/kg DM），X_2 表示来源于 MDCP 的磷含量（g/kg DM）。根据上述公式可知，DCP 和 MDCP 中磷的表观消化率分别为 86.4%和 103.6%。以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，MDCP 中磷的相对生物学利用率为 120%。

2.2.3　内源磷的排泄和磷酸盐中磷的真消化率

根据公式④建立的回归方程：

$$Y=-0.491+0.590X_0+0.884X_1+1.061X_2\ (R^2=0.915,\ P<0.001)。$$

式中：Y 表示表观可消化磷的摄入量（g/kg DMI），X_0 表示来源于基础饲粮的磷含量（g/kg DM），X_1 表示来源于 DCP 的磷含量（g/kg DM），X_2 表示来源于 MDCP 的磷含量（g/kg DM）。根据上述公式可知，内源磷的排泄量为 0.491 g/kg DMI，DCP 和 MDCP 中磷的真化率分别为 88.4%和 106.1%。以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，MDCP 中磷的相对生物学利用率为 120%，2 种磷酸盐的生物学利用率之间差异显著（P<0.05）。

2.3　不同磷酸盐对断奶仔猪血清指标的影响

不同磷酸盐对断奶仔猪血清指标的影响见表 4。由表可知，试验第 14 天和第 35 天，不同磷源及磷添加水平对断奶仔猪血清碱性磷酸酶活性均无显著影响（$P>0.05$），也无显著交互作用（$P>0.05$）。试验第 14 天，断奶仔猪血清磷含量在不同磷源及磷添加水平之间存在显著交互作用（$P<0.05$）；断奶仔猪血清钙含量在不同磷酸盐和磷添加水平间存在显著差异（$P<0.05$），并且存在显著的交互作用（$P<0.05$），表现为 MDCP 组断奶仔猪血清钙含量显著高于 DCP 组（$P<0.05$）；断奶仔猪血清降钙素含量在不同无机磷添加水平之间无显著差异（$P>0.05$），不同磷酸盐和不同磷添加水平之间也无显著交互作用（$P>0.05$），但不同磷酸盐之间存在显著差异（$P<0.05$），MDCP 组断奶仔猪血清降钙素含量显著低于 DCP 组（$P<0.05$）；断奶仔猪血清甲状旁腺素含量在不同磷酸盐和不同磷添加水平间存在显著的交互作用（$P<0.05$），添加 DCP 时，随着磷水平的提高，断奶仔猪血清甲状旁腺素含量无显著变化（$P>0.05$），而添加 MDCP 时，随着磷水平的提高，断奶仔猪血清甲状旁腺素含量显著提高（$P<0.05$）。

试验第 35 天，断奶仔猪血清磷含量在不同磷添加水平间存在显著差异（$P<0.05$），0.15%和 0.20%无机磷添加组血清磷含量显著高于 0、0.05%和 0.10%无机磷添加组（$P<0.05$）；断奶仔猪血清钙含量在不同无机磷添加水平间存在显著差异（$P<0.05$），随着无机磷添加水平的提高，血清钙含量显著提高（$P<0.05$）；血清降钙素含量在不同磷酸盐和不同无机磷添加水平间无显著变化（$P>0.05$），也无显著交互作用（$P>0.05$）。断奶仔猪饲粮无机磷添加水平对仔猪血清甲状旁腺素含量有显著影响（$P<0.05$），随着无机磷添加水平的提高，断奶仔猪血清甲状旁腺素显著降低（$P<0.05$）。

参照 Littell 等[15]的方法进行多元线性回归分析，结果显示，试验第 35 天断奶仔猪血清钙、磷、甲状旁腺素含量与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（P<0.05）。以血清钙、磷和甲状旁腺素含量为指标，建立的回归方程分别为：

$$Y_5=2.21+2.55X_1+2.45X_2（R^2=0.242，P=0.006）；$$

$$Y_6=3.86+7.99X_1+8.11X_2（R^2=0.386，P<0.001）；$$

Y_7=46.37－92.16X_1－106.16X_2（R^2=0.441，P<0.001）。

式中：Y_5表示血清钙含量（mmol/L），Y_6表示血清磷含量（mmol/L），Y_7表示血清甲状旁腺素含量（pg/mL），X_1、X_2分别表示 DCP、MDCP 的磷添加水平（%）。以 DCP 中磷的生物学利用率为100%，根据回归方程斜率比计算的MDCP的相对生物学利用率分别为96%、102%和 115%。MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率平均值为 104%。

表 4　不同磷酸盐对断奶仔猪血清指标的影响

Table 4　Effects of different phosphates on serum indices of weaned piglets

项目 Items	磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	第 14 天 The 14th day					第 35 天 The 35th day				
		碱性磷酸酶 ALP/(IU/L)	磷 P/(mmol/L)	钙 Ca/(mmol/L)	降钙素 CT/(pg/mL)	甲状旁腺素 PTH/(pg/mL)	碱性磷酸酶 ALP/(IU/L)	磷 P/(mmol/L)	钙 Ca/(mmol/L)	降钙素 CT/(pg/mL)	甲状旁腺素 PTH/(pg/mL)
	0	186.63	2.46^{ab}	4.36^{a}	51.59	35.13^{b}	155.18	2.19	3.91	56.44	42.34
	0.05	171.74	2.26^{a}	4.34^{a}	56.90	38.66^{b}	186.28	2.53	4.14	48.95	39.28
磷酸氢钙 DCP	0.10										
	0.15	179.90	2.26^{a}	4.79^{ab}	49.37	37.13^{b}	179.17	2.51	5.05	47.05	34.99
	0.20	170.44	2.61^{b}	4.86^{a}	50.04	33.85^{b}	171.40	2.73	5.51	52.63	26.73
	0.05	178.36	2.62^{b}	6.10^{c}	45.11	25.58^{a}	172.29	2.27	4.54	49.56	42.79
磷酸一二钙	0.10	184.98	2.49^{ab}	4.42^{a}	51.42	36.29^{b}	168.56	2.18	4.31	55.55	34.31
MDCP	0.15	175.05	2.62^{b}	5.39^{bc}	47.11	31.30^{ab}	165.24	2.81	5.39	51.59	34.66
	0.20	173.15	2.33^{ab}	4.44^{a}	47.07	40.92^{b}	171.47	2.67	5.37	44.37	25.67
SEM		9.46	0.14	0.29	2.89	3.19	8.93	0.12	0.30	2.86	3.14

磷源 Phosphorus source	磷酸氢钙 DCP	174.02	2.38	4.67[a]	52.10[b]	36.54	178.95	2.59	4.90	49.54	33.67
	磷酸一二钙 MDCP	177.89	2.52	5.09[b]	47.68[a]	33.52	169.39	2.48	4.90	50.27	34.35
磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	0	186.63	2.46	4.36[a]	51.59	35.13	155.18	2.19[a]	3.91[a]	56.44	42.34[c]
	0.05	175.05	2.44	5.22[b]	51.00	32.12	179.29	2.40[a]	4.34[a]	49.26	41.04[c]
	0.10	184.98	2.49	4.42[ab]	51.42	36.29	168.56	2.18[a]	4.31[a]	55.55	34.31[b]
	0.15	177.47	2.44	5.09[ab]	48.24	34.21	172.21	2.66[b]	5.22[b]	49.32	34.82[b]
	0.20	171.79	2.47	4.65[ab]	48.56	37.38	171.43	2.70[b]	5.44[b]	48.50	26.20[a]
*P*值 *P*-value	磷源 Phosphorus source	0.847	0.192	0.010	0.021	0.137	0.210	0.961	0.407	0.659	0.785
	磷添加水平 Phosphorus supplemental level	0.774	0.989	0.019	0.356	0.302	0.813	0.005	0.001	0.217	<0.001
	磷源×磷添加水平 Phosphorus source ×phosphorus supplemental level	0.828	0.033	0.002	0.198	0.010	0.666	0.079	0.615	0.085	0.737

2.4　不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼指标的影响

2.4.1　不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼断裂强度的影响

如表 5 所示，不同磷酸盐和不同无机磷添加水平对断奶仔猪股骨、胫骨和掌骨的断裂强度均无显著影响（$P > 0.05$），不同磷酸盐和不同无机磷添加水平之间对上述指标也无显著交互作用（$P > 0.05$）。

掌骨断裂强度与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（$P<0.05$）。以掌骨断裂强度为指标，建立的回归方程分别为：

$$Y_8=14.17+16.37X_1+37.90X_2（R^2=0.107，P=0.009）。$$

式中：Y_8 表示掌骨断裂强度（kg），X_1、X_2 分别表示 DCP、MDCP 的磷添加水平（%）。以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率为 232％。

表 5　不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼断裂强度的影响

Table 5　Effects of different phosphates on the bone fracture strength of weaned piglets

项目 Items	磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	骨骼断裂强度 Bone fracture strength/kg		
		股骨 Femur	胫骨 Tibia	掌骨 Metacarpal
磷酸氢钙 DCP	0	60.17	69.24	18.35
	0.05	52.56	78.97	16.57
	0.10	71.16	76.43	16.94
	0.15	55.73	57.15	17.66
	0.20	67.31	68.15	16.18
磷酸一二钙 MDCP	0.05	51.38	58.27	14.52
	0.10	50.94	61.87	18.49
	0.15	62.78	76.69	20.96
	0.20	90.19	87.35	21.06
SEM		12.15	12.38	1.96
磷源 Phosphorus source	磷酸氢钙 DCP	61.67	69.37	16.84
	磷酸一二钙 MDCP	63.82	71.44	18.76
磷添加水平	0	60.17	69.23	18.35

Phosphorus supplemental level/%	0.05	51.91	66.55	15.50
	0.10	60.13	69.81	17.71
	0.15	59.25	66.92	19.31
	0.20	78.75	77.75	18.62
*P*值 *P*-value	磷源 Phosphorus source	0.927	0.908	0.301
	磷添加水平 Phosphorus supplemental level	0.214	0.716	0.517
	磷源×磷添加水平 Phosphorus source×phosphorus supplemental level	0.229	0.120	0.131

2.4.2 不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼灰分含量的影响

如表 6 所示，股骨、胫骨和掌骨灰分含量在不同磷酸盐之间无显著差异（$P > 0.05$），但 MDCP 组断奶仔猪股骨钙、磷含量以及胫骨、掌骨的钙含量均显著高于 DCP 组（$P<0.05$）。另外，无机磷添加水平显著影响掌骨灰分含量（$P<0.05$），0.05%、0.10%和 0.20%无机磷添加组掌骨灰分含量显著高于 0 和 0.15%无机磷添加组（$P<0.05$）。

股骨灰分含量与磷添加水平之间存在显著的线性回归关系（$P<0.05$）。以股骨灰分含量为指标，建立的回归方程分别为：

$$Y_9=35.67+13.36X_1+34.06X_2\ (R^2=0.702，P=0.048)。$$

式中：Y_9 表示股骨灰分含量（%），X_1、X_2 分别表示 DCP、MDCP 的磷添加水平（%）。以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率为 255%。

表 6 不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼灰分含量的影响

Table 6 Effects of different phosphates on the ash content in bones of weaned piglets %

项目 Items	磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	股骨 Femur			胫骨 Tibia			掌骨 Metacarpal		
		灰分 Ash	钙 Ca	磷 P	灰分 Ash	钙 Ca	磷 P	灰分 Ash	钙 Ca	磷 P
磷酸氢钙	0	39.39	2.98	1.20	61.46	3.68	1.25	32.23	2.04	1.01
DCP	0.05	40.13	3.19	1.24	39.50	2.06	1.20	37.81	2.21	1.16

	0.10	40.42	3.30	1.24	42.29	2.78	1.28	41.28	2.39	1.21
	0.15	37.07	3.08	1.17	39.34	2.83	1.19	30.36	2.02	0.96
	0.20	39.91	3.60	1.26	36.84	2.88	1.29	39.18	2.80	1.23
磷酸一二钙 MDCP	0.05	41.97	3.74	1.32	38.26	3.03	1.20	36.45	2.72	1.11
	0.10	40.75	3.72	1.26	42.43	3.52	1.29	41.42	3.18	1.21
	0.15	44.11	3.84	1.33	45.56	3.83	1.35	34.37	2.94	1.19
	0.20	50.09	4.20	1.37	71.49	3.79	1.36	40.94	3.59	1.28
磷源 Phosphorus source	磷酸氢钙 DCP	39.38	3.29^{a}	1.23^{a}	39.49	2.64^{a}	1.24	37.16	2.35^{a}	1.14
	磷酸一二钙 MDCP	44.23	3.87^{b}	1.32^{b}	49.43	3.54^{b}	1.30	38.29	3.11^{b}	1.20
磷添加水平 Phosphorus supplemental level/%	0	39.39	2.98	1.20	61.46	3.68	1.25	32.23^{a}	2.04	1.01
	0.05	41.05	3.46	1.28	38.88	2.54	1.20	37.13^{b}	2.47	1.14
	0.10	40.58	3.51	1.25	42.36	3.15	1.29	41.35^{b}	2.78	1.21
	0.15	40.59	3.46	1.25	42.45	3.33	1.27	32.36^{a}	2.48	1.07
	0.20	45.00	3.90	1.32	54.16	3.34	1.32	40.06^{b}	3.20	1.26
P 值 *P*-value	磷源 Phosphorus source	0.071	0.011	0.021	0.238	0.015	0.249	0.711	0.024	0.461
	磷添加水平 Phosphorus supplemental level	0.721	0.698	0.797	0.661	0.612	0.361	0.018	0.556	0.294

3 讨 论

3.1 不同磷酸盐对断奶仔猪生长性能的影响

当饲粮中磷缺乏时，动物生长缓慢[16]，因此，可用生长性能反映饲粮磷水平的变化。本研究结果表明，试验后期 MDCP 组仔猪平均日采食量显著高于 DCP 组，这与曹慧[5]的研究结果一致。本试验的结果表明，随着饲粮磷水平的上升，仔猪的生长性能有所改善，De Oliveira Souza 等[17]得到了相似的结果，而黄阿彬[18]在育肥猪上的研究表明，钙磷水平对育肥猪生长性能无显著影响，这可能是由于仔猪骨骼发育需要大量的磷，饲粮磷水平对仔猪生长影响要大于育肥猪[19]。一直以来，相对生物学利用率都被用来评定饲料中磷的利用率[20]。

该方法是基于动物体内磷总量的变化，因此需要给动物饲喂低于动物磷需要量的饲粮[20]。DCP 是最常用的饲粮无机磷源，当评估其他原料的相对生物学利用率时，DCP 可以用作标准参照物[21]。本试验以生长性能（平均日增重和平均日采食量）为指标，以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，计算得到的 MDCP 的相对生物学利用率为 123%。本试验以平均日增重和平均日采食量为对象计算的相对生物学利用率 R^2 值偏低，并且不同磷酸盐之间的回归方程斜率也差异不显著，原因是仔猪的生长受到多方面因素的影响，因此以增重和采食量等作为无机磷源生物学利用率评定指标时，灵敏度相对较低。Newman 等[22]也发现动物的生长性能与饲粮磷水平并不存在显著的线性关系，认为生长性能并不能作为评定磷相对生物学利用率的指标。

3.2 不同磷酸盐对断奶仔猪饲粮消化率的影响

无机磷的消化和利用率通常高于植物原料中的有机磷，猪饲粮中含有一定量的无机磷，可以弥补植物原料中有机磷的低消化率[4]。DCP、MCP 和 MDCP 是饲料工业中常用的无机磷原料，DCP 为枸溶性，MCP 为水溶性，MDCP 为水溶磷、总磷含量高，水溶性磷酸盐动物更容易吸收，因此 MCP 及 MDCP 中的磷的消化率要高于 DCP[4]。本研究结果表明仔猪饲粮中添加 MDCP 时，仔猪饲粮钙和磷的表观全消化道消化率均显著高于添加 DCP，这与王秀静[23]在断奶仔猪上的研究结果一致，贾海康[24]在肉鸡上的研究同样表明 MDCP 组磷的表观全消化道消化率显著高于 DCP 组。磷酸盐的表观消化率与磷的存留量有较强的相关性，且磷酸盐表观消化率测定的重复性较好，因而采用表观消化率能较准确估计磷酸盐的利用率[25]。本试验结果表明以玉米－豆粕型饲粮为基础饲粮的磷的消化率最低，平均为 45.42%，Grimbergen 等[26]的研究报道了仔猪采食玉米－豆粕型饲粮磷的消化率为 30%。本试验结果比 Grimbergen 等[26]的试验结果略高，原因可能是 Grimbergen 等[26]的试验是在 30 年前做的，随着育种的发展，猪的品种、饲料品质等各方面均发生了较大的变化。

磷的全消化道消化率可以用表观消化率或真消化率表示，真消化率是利用内源磷校正表观消化率值计算得到的[4]。内源磷通常通过梯度回归计算得到，但文献报道的猪内源磷排泄量变化范围很大，从 70 mg/kg DMI[27-28]到 1 240 mg/kg DMI[29]。张艳玲[30]用回归法测定母猪的内源磷的排泄量为 0.89 g/kg DMI，阉公猪内源磷的排泄量为 1.08 g/kg DMI；罗赞等[12]用回归法测定生长猪的内源磷排泄量为（0.798±0.04） g/kg DMI；王顺祥等[29]用回归法测定生长猪的内源磷排泄量为（1.24±0.29） g/kg DMI；Fan 等[13]用回归法测定仔猪的内源磷排泄量为（0.31±0.06） g/kg DMI。本试验测得仔猪内源磷的排泄量为 0.491 g/kg DMI，比 Fan 等[13]的结果略高，但低于生长猪和母猪的结果。不同试验饲粮、不同生产阶段、不同品种的

猪的内源磷排泄量存在较大差异。Ammerman 等[31]认为内源粪磷理论上包括"最小内源磷排出量"和"可变内源磷排出量"2 部分，前者是指机体内最小的或不可避免的内源性损失量，后者则在很大程度上受采食量的影响。回归分析法并没有保证猪采食量保持一致，这可能是不同研究间内源磷结果差异较大的原因。

本试验饲粮磷的表观消化率和真消化率相差较大，这与内源磷含量有关。内源磷对消化率的影响要体现在表观消化率上，而对真消化率影响很小[29]。因此，用真消化率更能准确反映饲粮磷可被利用的真实情况。而本试验中，MDCP 中磷的表观消化率与真消化率相近，本试验条件下饲粮磷水平在 0.32%~0.53%时，内源磷的排泄对磷酸盐中磷的表观消化率没有显著的影响[32]。曹慧[5]也发现饲粮磷水平在 0.33%~0.47%，内源磷对磷的表观消化率无显著影响。因此，磷酸盐的表观消化率能较准确地反映磷酸盐的利用率。

Baker 等[21]、Rodehutscord 等[33]及 Petersen 等[34]利用无磷饲粮测定得到的仔猪对 DCP 中磷的表观消化率分别为 86.1%、87.0%和 81.5%，与本试验结果（85.2%）相近。但本试验结果高于 Jongbloed 等[35]及 Eeckhout 等[2]的结果，后者分别为 69%和 73%。DCP 中磷的消化率与 DCP 中无水和二水磷酸氢钙的比例有关[26]，这可能是不同试验结果差异的原因。

到目前为止，有关饲料级磷酸盐真消化率的报道较少，所用的方法也很有限，Grimbergen 等[26]以梯度回归法测定了饲料级 DCP 及 MCP 的真消化率，分别为 89.7%、71.9%。本试验以梯度回归法测定的 DCP 和 MDCP 的真消化率为 85.2%和 102.8%。本试验 DCP 的结果与 Grimbergeen 等[26]相近。刘静波等[36]用差量法计算得到的 DCP 的真消化率为 81.02%，这与本研究结果相似。MDCP 中磷的表观消化率与真消化率具有高度的相关性，也是很好地评定磷酸盐生物学效价的方法。本试验研究表明，以表观可消化磷为指标，以 DCP 为参照，MDCP 的相对生物学利用率为 118%；曹慧[5]以表观可消化磷为指标，以 DCP 为参照，MDCP 的相对生物学利用率为 116.8%，这与本试验结果相似。本试验以磷的表观消化率和真消化率为指标，MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率均为 120%。霍启光[37]研究表明，若以 DCP 为参照折算，则 MCP 的相对生物学效价为 111%~125%；Zwart[38]研究表明，若以 DCP 为参照物，则 MDCP 的相对生物学效价为 106.4%~123.6%；Waibel 等[39]以生长性能、消化率为指标，以试剂级 DCP 为参照，MDCP 的相对生物学效价分别为（118.6±8.17）%和（123.7±8.59）%。从以上可见，本试验的研究结果与其他各研究者的结果十分接近。

3.3 不同磷酸盐对断奶仔猪血清指标的影响

血清钙、磷含量及碱性磷酸酶活性常用来评价动物磷的营养状况，碱性磷酸酶是衡量钙磷代谢的重要生化指标[16]，血清磷含量降低与碱性磷酸酶活性升高常作为动物缺磷的标志。

Boyd 等[40]研究发现，饲粮中磷含量在 0.28%~0.52%时，仔猪第 14 天和第 21 天的血清碱性磷酸酶活性与饲粮磷水平呈显著负相关。本试验结果表明，采食基础饲粮的仔猪，第 14 天和第 35 天的血清碱性磷酸酶活性平均为 186.63 和 155.18 IU/L，这与 Boyd 等[40]、曹慧[5]研究结果很相近。但当在基础饲粮的水平上梯度添加磷酸盐后，血清碱性磷酸酶活性并没有出现规律性的变化，仔猪在在和实验第 11 天和第 35 天时，不同磷源及磷添加水平对仔猪血清碱性磷酸酶活性均无显著影响，也无显著交互作用。曹慧[5]与谭占坤[3]研究也发现不同磷酸盐对血清碱性磷酸酶活性无显著影响，这与本研究结果一致。以饲粮磷含量为自变量，血清碱性磷酸酶活性为因变量所拟合的线性方程无显著的线性关系，因此以碱性磷酸酶活性作为评定磷相对生物学利用率的指标灵敏度较低[32]。碱性磷酸酶活性与饲粮中的磷没有显著的相关性，原因可能是碱性磷酸酶有骨骼以及非骨骼 2 种来源，骨骼中碱性磷酸酶的确切功能以及调节机制还不清楚。

本研究结果表明，仔猪在试验第 14 天时，不同磷源及添加水平对血清磷含量无显著影响，这与王秀静[23]在仔猪上的研究结果一致。本试验结果表明，当仔猪饲粮磷水平从 5.7 g/kg 降到 4.7 g/kg 时，血清无机磷水平从 2.70 mmol/L 下降到 2.19 mmol/L。10~25 kg 仔猪正常情况下，血清无机磷含量在 2.6~3.2 mmol/L。以上结果与 Sands 等[41]、Miller 等[42]研究结果相似。本研究中，仔猪在试验第 14 天时，MDCP 组仔猪血清钙含量显著高于 DCP 组，第 35 天时，MDCP 组与 DCP 组仔猪血清钙含量无显著差异。王秀静[23]在仔猪上的研究同样表明，不同磷源对（56±2）日龄的仔猪血清钙含量无显著影响。降钙素与甲状旁腺素是影响动物骨骼生成与吸收的主要激素[18]，当血清中钙含量下降时，降钙素含量降低，甲状旁腺素含量升高。本研究结果表明，仔猪在试验第 14 天时，MDCP 组血清 CT 含量显著低于 DCP 组，但在试验第 35 天时，二者差异不显著。仔猪在试验第 14 天时，MDCP 组血清甲状旁腺素含量随磷添加水平的提高而升高，此时 MDCP 组仔猪血清钙含量随磷添加水平的提高而下降；仔猪在试验第 35 天时，随着无机磷添加水平的提高，仔猪血清甲状旁腺素显著降低，此时仔猪血清钙含量随磷添加水平的升高而升高。

3.4　不同磷酸盐对断奶仔猪骨骼指标的影响

骨骼指标常用作敏感指标来评定磷酸盐生物学利用率[43]，动物体内 80%的磷储存于骨骼内，骨骼指标较其他指标更具有敏感性[44]。但本研究中股骨、胫骨和掌骨灰分含量在不同磷酸盐之间无显著差异。谭占坤[12]在蛋鸡上的研究也得到了相似的结果。本研究表明，不同磷源对仔猪股骨钙、磷含量以及胫骨、掌骨钙含量有显著影响，MDCP 组均显著高于 DCP 组，这与董作一等[45]研究结果相似。在本试验中，无机磷添加水平对股骨和胫骨灰分含量无

显著影响，但显著影响掌骨灰分含量，0.05%、0.10%和 0.20%无机磷添加组掌骨灰分含量显著高于 0 和 0.15%组，这与罗士津等[46]研究结果不同，可能原因是本研究中磷的添加梯度与其不同所致。

3.5　相对生物学效价

几十年来，很多试验对磷相对生物学效价的敏感指标进行了研究，不同研究者采用的指标也不同，主要有生产性能指标、骨骼发育指标、血清指标和外观指标(缺磷发病率和程度)等。不同的学者采用不同的指标，所得的结果不完全一致。Petersen 等[4]研究表明，以掌骨断裂强度为指标，以 DCP 为参照折算，则 MCP 和 MDCP（含 70%MCP）的相对生物学利用率分别为 191.2%和 140.3%。Waibel 等[39]以血清指标及股骨灰分含量为对象，以试剂级 DCP 为参照，MDCP 的相对生物学利用率分别为（104.2±9.89）%和（243.2±16.55）%。从以上可见，本试验的研究结果与其他各研究者的结果十分接近。本试验以掌骨断裂强度和股骨灰分含量为指标，以 DCP 中磷的生物学利用率为 100%，根据回归方程斜率比计算的 MDCP 的相对生物学利用率分别为 232%和 25%。涂广运[47]和贾海康[24]在肉鸡上的研究同样表明，以骨骼指标作为敏感指标，MDCP 的相对生物学利用率显著高于 DCP。

由于相对效价表示的磷的利用率是一个相对值，它的大小依赖于所使用的参照物，因此随着参照物磷利用率的不同，可能出现被测原料磷的相对效价大于 100%的情况。本试验选用了利用率较高的试剂级 DCP 作为参照物，出现被测 MDCP 的相对效价大于 100%的情况。MDCP 的真实利用率虽然很高，却很难达到 100%，因此，在实际生产过程中相对效价可以作为估计磷酸盐用率的一个参考，而真实利用率能反映真正被动物所利用的磷酸盐量。

动物对含结晶水磷酸盐的利用率要高于不含结晶水的磷酸盐。这是因为：一方面，含结晶水的磷酸盐在酸性环境中的溶解速度要大于不含结晶水的磷酸盐，因此它在小肠胃酸的作用下能迅速溶解被动物所利用[48]；另一方面，饲料级磷酸盐产品的混合或络合比例对其生物学效价也有显著影响，尤其是 MDCP 是 DCP 与 MCP 的结合物，随着二者结合比例的不同，其生物学效价有显著差异[4]。Kemme 等[49]测定了 2 种饲料级 MDCP 的相对效价，其混合比例分别为 75%MCP、25%DPC 与 50%MCP、50%DCP，测得的相对效价分别为 89.2%与 83.6%。本试验所用 MDCP 具有较好的水溶性和较高的 MCP 比例，这应该与本试验 MDCP 的相对生物学利用率及真消化率显著高于 DCP 有关。

4　结　论

① 本试验条件下，以磷的表观消化率和真消化率为指标，MDCP的生物学利用率显著高于DCP，以DCP中磷的生物学利用率为100%，MDCP的相对生物学利用率为120%。

② 本试验条件下，14.65 kg的杜×长×大杂交断奶仔猪内源磷的排泄量为0.491 g/kg DMI，MDCP中磷的表观消化率和真消化率分别为103.6%和106.1%。

③ 本试验条件下，以血清指标和股骨灰分含量为对象，以试剂级DCP为参照，MDCP的相对生物学利用率分别为104%和255%。

参考文献：

[1] 万荣,何姝颖,谢木林.不同无机磷源对仔猪腹泻及肠道微生态的影响[J].饲料研究,2015(23):25–28.

[2] EECKHOUT W,DE PAEPE M.The digestibility of three calcium phosphates for pigs as measured by difference and by slope-ratio assay[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,1997,77(1/2/3/4/5):53–60.

[3] 谭占坤.磷来源和水平对蛋鸡生产性能、蛋品质和骨骼质量的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2011.

[4] PETERSEN G I,PEDERSEN C,LINDEMANN M D,et al.Relative bioavailability of phosphorus in inorganic phosphorus sources fed to growing pigs[J].Journal of Animal Science,2011,89(2):460–466.

[5] 曹慧.猪对饲料级磷酸盐磷生物学利用率的研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2003.

[6] 夏良宙,李霞,万荣.不同种类和来源磷酸钙盐对肉鸡生产性能和养分代谢的影响[J].饲料工业,2014(增刊):48–52.

[7] 万荣,谢木林,何姝颖.不同无机磷源对仔猪生产性能和表观消化率的影响[J].饲料研究,2015(21):19–22,51.

[8] 万荣,谢木林.新型磷源III型磷酸氢钙在肉鸡上相对生物学利用率的应用研究[J].饲料广角,2014(16):16–19.

[9] 陈晓春,姜光丽,周光荣.磷酸一二钙在产蛋鸡配合饲料中的应用研究[J].中国家禽,2007,29(22):12–15.

[10] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].2版.北京:中国农业大学出版社,2003.

[11] 邓雪娟,刘国华,蔡辉益,等.分光光度计法测定家禽饲料和食糜中二氧化钛[J].饲料工业,2008,29(2):57–58.

[12] 罗赞,贺建华,田科雄,等.线性回归法测定生长猪内源磷排泄量及鱼粉磷真消化率[J].动物

营养学报,2009,21(4):441–446.

[13] FAN M Z,ARCHBOLD T,SAUER W C,et al.Novel methodology allows simultaneous measurement of true phosphorus digestibility and the gastrointestinal endogenous phosphorus outputs in studies with pigs[J].The Journal of Nutrition,2001,131(9):2388–2396.

[14] SHEN Y R,FAN M Z,AJAKAIYE A,et al.Use of the regression analysis technique to determine the true phosphorus digestibility and the endogenous phosphorus output associated with corn in growing pigs[J].The Journal of Nutrition,2002,132(6):1199–1206.

[15] LITTELL R C,HENRY P R,LEWIS A J,et al.Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures[J].Journal of Animal Science,1997,75(10):2672–2683.

[16] CROMWELL G L.Biological availability of phosphorus for pigs[J].Feedstuffs,1980,52(9):38–42.

[17] DE OLIVEIRA SOUZA L W,DE SANT'ANNA MORETTI A,TUCCI F M,et al.Phosphorus availability of rock phosphates as compared with feed-grade phosphates for swine[J].Revista Brasileira de Zootecnia,2009,38(1):90–98.

[18] 黄阿彬.不同磷源及水平对育肥猪生长性能和骨骼质量的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2013.

[19] 何姝颖,万荣.猪对钙磷营养代谢研究进展[J].饲料广角,2016(1):28–31.

[20] CROMWELL G L.The biological availability of phosphorous in feedstuffs for pigs[J].Pig News and Information,1992,13:75–78.

[21] BAKER S R,KIM B G,STEIN H H.Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs[J].Journal of Animal Science,2013,91(1):203–210.

[22] NEWMAN C W,ELLIOTT D O.Source and level of phosphorus for growing-finishing swine[J].Journal of Animal Science,1976,42(1):92–98.

[23] 王秀静.不同无机磷源对断奶仔猪生长性能、肠道形态结构及肠道稳态的影响[D].硕士学位论文.南昌:江西农业大学,2015.

[24] 贾海康.不同磷酸盐对肉鸡的适宜用量研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2016.

[25] JONGBLOED A W.Phosphorus in the feeding of pigs:effect of diet on the absorption and retention of phosphorus by growing pigs[D].Ph.D Thesis.Lelystad:Agricultural

University,1987.

[26] GRIMBERGEN A H M,CORNELISSEN J P,STAPPERS H P.The relative availability of phosphorus in inorganic feed phosphates for young turkeys and pigs[J].Animal Feed Science and Technology,1985,13(1/2):117–130.

[27] DILGER R N,ADEOLA O.Estimation of true phosphorus digestibility and endogenous phosphorus loss in growing pigs fed conventional and low-phytate soybean meals[J].Journal of Animal Science,2006,84(3):627–634.

[28] PETTEY L A,CROMWELL G L,LINDEMANN M D.Estimation of endogenous phosphorus loss in growing and finishing pigs fed semi-purified diets[J].Journal of Animal Science,2006,84(3):618–626.

[29] 王顺祥,印遇龙,李铁军,等.回归法测定生长猪内源磷排泄量及磷真消化率研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):33–38.

[30] 张艳玲.利用线性回归法测定小母猪和阉公猪内源钙、磷排泄量和豆粕钙、磷真消化率的研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.

[31] AMMERMAN C B,BAKER D H,LEWIS A J.Bioavailability of nutrients for animals:Amino acids,minerals,and vitamins[M].San Diego:Academic Press,1995.

[32] DELLAERT B M,VAN DER PEET G F,JONGBLOED A W,et al.A comparison of different techniques to assess the biological availability of feed phosphates in pig feeding[J].Netherlands Journal of Agricultural Science,1990,38(3):555–566.

[33] RODEHUTSCORD M,FAUST M,DÜNGELHOEF M,et al.Zur messung der verdaulichkeit des phosphors aus mineralischen phosphor-trägern sowie aus mineralfuttern,eiweißkonzentraten und alleinfuttern für schweine[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2010,71(1/2/3/4/5):169–178.

[34] PETERSEN G I,STEIN H H.Novel procedure for estimating endogenous losses and measurement of apparent and true digestibility of phosphorus by growing pigs[J].Journal of Animal Science,2006,84(8):2126–2132.

[35] JONGBLOED A W,EVERTS H,KEMME P A.Phosphorus availability and requirements in pigs[M]//HARESIGN W,COLE D J A,eds.Recent Advances in Animal Nutrition.Amsterdam:Elsevier,1991:65–80.

[36] 刘静波,曹山川,黄溢,等.生长猪基础饲粮类型对饲粮无机磷的磷真消化率的影响[J].中国

畜牧杂志,2016,52(13):43–47.

[37] 霍启光.动物磷营养与磷源[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002.

[38] ZWART S.Bio-availability of feed phosphates[J].Feed Compounder,1999,19(2):34–38.

[39] WAIBEL P E,NAHORNIAK N A,DZIUK H E,et al.Bioavailability of phosphorus in commercial phosphate supplements for turkeys[J].Poultry Science,1984,63(4):730–737.

[40] BOYD R D,HALL D,WU J F.Plasma alkaline phosphatase as a criterion for determining biological availability of phosphorus for swine[J].Journal of Animal Science,1983,57(2):396–401.

[41] SANDS J S,RAGLAND D,BAXTER C,et al.Phosphorus bioavailability,growth performance,and nutrient balance in pigs fed high available phosphorus corn and phytase[J].Journal of Animal Science,2001,79(8):2134–2142.

[42] MILLER E R,ULLREY D E,ZUTAUT C L,et al.Phosphorus requirement of the baby pig[J].Journal of Nutrition,1964,82(1):34–40.

[43] KOCH M E,MAHAN D C,CORLEY J R.An evaluation of various biological characteristics in assessing low phosphorus intake in weanling swine[J].Journal of Animal Science,1984,59(6):1546–1556.

[44] ANGEL R,SAYLOR W W,MITCHELL A D,et al.Effect of dietary phosphorus,phytase,and 25-hydroxycholecalciferol on broiler chicken bone mineralization,litter phosphorus,and processing yields[J].Poultry Science,2006,85(7):1200–1211.

[45] 董作一,何姝颖.不同无机磷源在生长育肥猪上的相对生物学效价[J].饲料广角,2016(17):25–29.

[46] 罗士津,瞿明仁,张铁鹰.低磷日粮对猪生长性能、骨骼及血液指标的影响[J].中国畜牧业,2015(20):77–79.

[47] 涂广运.福美双诱导条件下磷源和水平对肉鸡生产性能和胫骨质量的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2012.

[48] RUCKER R B,PARKER H E,ROGLER J C.Utilization of calcium and phosphorus from hydrous and anhydrous dicalcium phosphates[J].Journal of Nutrition,1969,96(4):513–518.

[49] KEMME P A,RADCLIFFE J S,JONGBLOED A W,et al.Factors affecting phosphorus and calcium digestibility in diets for growing-finishing pigs[J].Journal of Animal Science,1997,75(8):2139–2146.

Effects of High Water-Soluble Mono-Calcium and Di-Calcium Phosphate on Growth Performance, Dietary Digestibility, Serum and Bone Indices of Weaned Piglets

LYU Xiaokang CHAI Jianmin WANG Jie SI Bingwen CUI Kai WANG Shiqin TU Yan DIAO Qiyu ZHANG Naifeng*

(*Feed Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This study was conducted to determine the relative biological value (RBV) of mono-calcium and di-calcium phosphate (MDCP) by using dibasic calcium phosphate (DCP) as the reference and taking the growth performance, dietary digestibility, serum and bone indices of weaned piglets as indicators. With a 2×5 factorial arrangement experimental design, four hundred and thirty-two Duroc×Large white×Yorkshire weaned piglets with similar body weight and 4 to 5 weeks of age were randomly allocated into 9 groups with 6 replicates in each group and 8 piglets in each replicate. The phosphates were added into a basal diet at 5 phosphorus supplemental levels as 0, 0.05%, 0.10%, 0.15% and 0.20% (0 supplemental group was shared), respectively, and there were 9 treatments in all. The adaptation period lasted for 3 days and the experimental period lasted for 35 days. The results showed as follows: 1) no significant interaction was found between phosphorus source and phosphorus supplemental level on the average daily feed intake, average daily gain and mortality of piglets ($P>0.05$). The average daily feed intake of piglets in MDCP group was significantly higher than that in DCP group during 15 to 35 days of experiment ($P<0.05$). With the increasing of dietary phosphorus levels, the average daily gain and average daily feed intake were significantly increased ($P<0.05$), but the feed conversion rate was not significantly changed ($P>0.05$). 2) There was no significant interaction between phosphates source and phosphorus supplemental level on the apparent digestibility of dry matter, calcium and phosphorus in piglets ($P>0.05$). The apparent digestibility of calcium and phosphorus in MDCP group was significantly higher than that in DCP group ($P<0.05$). The apparent digestibility of calcium in 0.10%, 0.15% and 0.20% phosphorus supplemental groups was significantly higher than that in 0 supplemental group ($P<0.05$). The RBVs of MDCP calculated by the slope ratio were both 120% regarding the apparent digestibility and true digestibility of phosphorus as indicators and DCP as reference. 3) At the 14th and 35th day of experiment, the serum alkaline

phosphatase (ALP) activity of piglets were not significantly affected by different phosphorus sources and supplemental levels (*P*>0.05), and there was no significant interaction either (*P*>0.05). At the 14th day of experiment, serum contents phosphorus, calcium and parathyroid hormone (PTH) were significantly interacted between different phosphorus source and phosphorus supplemental level (*P*<0.05), but there was no significant interaction at the 35th day of experiment (*P*<0.05). At the 14th day of experiment, the serum calcium content in MDCP group was significantly higher than that in DCP group (*P*<0.05), and the serum calcitonin (CT) content in MDCP group was significantly lower than that in DCP group (*P*<0.05). At the 14th and 35th day of experiment, the serum CT content showed no significant interaction between different phosphates and different phosphorus supplemental level (*P*>0.05). There was a significant linear regression relationship between the serum contents of calcium, phosphorus, PTH and phosphorus supplemental level (*P*<0.05). With regression equations established by using serum contents of calcium, phosphorus and PTH as indicators, the RBVs of MDCP calculated by the slope ratio of regression equation were 96%, 102% and 115% (mean was 104%), respectively. 4) There was no significant difference in the bone fracture strength of femur, tibia and metacarpal of different phosphates and different phosphorus supplemental level (*P*>0.05) and no significant interaction either (*P*>0.05). There was a significant linear regression between femur ash content and phosphorus supplemental level (*P*<0.05). Based on the femur ash content, the RBV of MDCP calculated by the slope ratio of regression equation was 255%. In summary, taking the RBV of reagent grade DCP as 100%, based on apparent digestibility and true digestibility of phosphorus, the RBVs of MDCP were both 120%; and based on the serum indices and femur ash content, the RBVs of MDCP were 104% and 255%, respectively.

Key words: weaned piglet; mono-calcium and di-calcium phosphate; dibasic calcium phosphate; growth performance; digestibility; serum indices; bone indices; relative biological value

i

*Corresponding author, professor, E-mail: zhangnaifeng@caas.cn (责任编辑　田艳明)